

DER STAHLBAU

Schriftleitung:
 Geh. Regierungsrat Professor Dr.-Ing. A. Hertwig, Berlin-Wilmersdorf, Sächsische Str. 43
 Fernsprecher: 87 7421
 Professor W. Rein, Breslau, Technische Hochschule. — Fernsprecher: Breslau 421 61

Beilage
 zur Zeitschrift

DIE BAUTECHNIK

Fachschrift für das ge-
 samte Bauingenieurwesen

Preis des Jahrganges 10 RM und Postgeld

10. Jahrgang

BERLIN, 18. Juni 1937

Heft 13

Grundsätzliche Bemerkungen zur Frage der Beulsicherheit der Stegbleche vollwandiger Blechträger.¹⁾

Alle Rechte vorbehalten.

Von Reichsbahnoberrat Dr.-Ing. Krabbe, München.

Wenn auch bisher kaum Fälle bekanntgeworden sind, in welchen das Stegblech eines vollwandigen Brückenträgers ausgebeult oder eine Aussteifung des Stegbleches ausgeknickt wäre, so zwingt uns doch der Umstand, daß wir bei unseren neuzeitlichen Brückenbauten vollwandige Blechträger von erheblichen Abmessungen bevorzugen, dazu, den Abmessungen dieser vollwandigen Träger auch hinsichtlich der Stegbleche und deren Aussteifungen erhöhte Aufmerksamkeit zuzuwenden. Blechträger mit erheblichen Abmessungen sind ohnehin im Stoffverbrauch ungünstiger als Fachwerkträger; wir müssen also bestrebt sein, hier durch ausreichende, aber nicht übertriebene Abmessungen dieses Mehrgewicht in wirtschaftlich vertretbaren Grenzen zu halten.

Das Ausbeulen der Stegbleche scheint zunächst ein etwas verwickelter Knickvorgang zu sein, bei welchem in fast allen Fällen mehrachsige Spannungszustände in Verbindung mit nicht gerade einfachen Auflagerbedingungen vorliegen. Um uns die Aufgabe etwas zu erleichtern, nehmen wir einspannungsfreie Lagerung des zu untersuchenden Stegblechfeldes an den Gurtungen und Aussteifungen an.

Man könnte nun von einem einachsigen Spannungszustand, welcher sich aber von Faser zu Faser ändert, höchstens beim Mittelfeld eines Trägers auf zwei Stützen mit vorwiegend reiner Biegebeanspruchung reden. Im Endfeld haben wir zwar fast reine Schubspannung, aber diese müssen wir bekanntlich ersetzt denken durch unter 45° geneigte, sich senkrecht kreuzende Zug- und Druckfasern mit entgegengesetzt gleicher Spannung; es liegt hier also ein zweiachsiger Spannungszustand vor, bei welchem die der

Die zur Zeit gültige Theorie fußt auf dem von Bryan und Timoschenko aufgestellten Potential, welches die innere Arbeit eines ausgebeulten, unter der Einwirkung äußerer Kräfte stehenden Stegblechfeldes von der Länge a und der Breite b darstellt, jedoch nur denjenigen Anteil dieser inneren Arbeit, welcher von der Gestalt und Größe der Ausbeulungen w abhängig ist; die von äußeren Kräften herrührenden Spannungen σ_x , σ_y und τ_{xy} sind als unveränderliche Größen angenommen, also von den Ausbeulungen w unabhängig. Zum Verständnis der hier zu behandelnden grundsätzlichen Fragen muß die auf dieses Potential gegründete Theorie kurz erörtert werden.

Das Potential hat die Form:

$$(1) \quad \mathfrak{A}_I = \frac{E}{1-\mu^2} \cdot \frac{t^3}{12} \int_0^a \int_0^b \left\{ \frac{1}{2} \left[\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right]^2 - (1-\mu) \left[\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \cdot \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} - \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \right)^2 \right] \right\} dx dy + t \int_0^a \int_0^b \left[\frac{\sigma_x}{2} \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 + \frac{\sigma_y}{2} \left(\frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 - \tau_{xy} \frac{\partial w}{\partial x} \cdot \frac{\partial w}{\partial y} \right] dx dy,$$

wobei die Kräfte in der Pfeilrichtung des Bildes 3 als positiv angenommen sind.

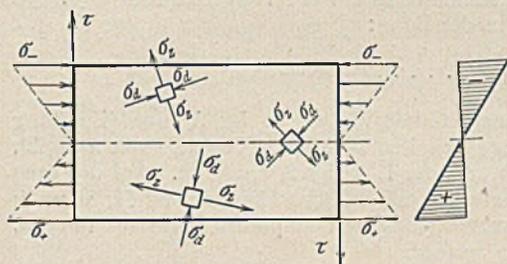


Bild 1. Lage der Hauptspannungen bei Biegung und Schub.

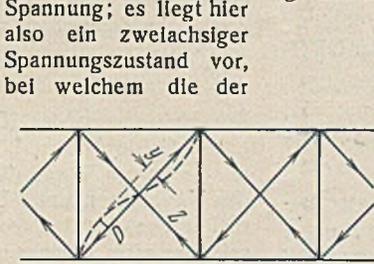


Bild 2. Ausbiegung der Druckstrebe nach Erreichen der Knickspannung.

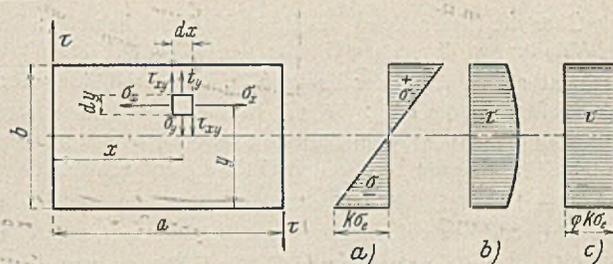


Bild 3. Verteilung der Biege- und Schubspannungen.

Beulgefahr unterliegenden Druckfasern in unendlich kleinen Abständen durch entgegengesetzt gleich beanspruchte Zugfasern gestützt werden. Tritt dazu noch Biegebeanspruchung, wie in fast allen Fällen, so ändert sich die Lage der Hauptspannungsfasern; sie kreuzen sich auch noch rechtwinklig, erscheinen aber nicht mehr unter 45°, sondern unter einem anderen Winkel gegen die Waagerechte geneigt; in der Druckzone sind die Druckfasern, in der Zugzone die Zugfasern stärker beansprucht, während in der Mittelachse des Trägers reiner Schub, gekennzeichnet durch unter 45° geneigte gleichwertige Druck- und Zugfasern, vorhanden ist (Bild 1). Diese Lage der Hauptspannungen müssen wir genau beachten, wenn wir die Frage der Ausbeulungsgefahr verfolgen wollen. Es liegen hier Verhältnisse vor, wie wir sie in sehr vereinfachter Form in einem Fachwerkträger mit Pfosten und gekreuzten Zug- und Druckstreben vorfinden (Bild 2). Der Vollwandträger ist aber dem Fachwerkträger dadurch überlegen, daß er imstande ist, die Richtung seiner Zug- und Druckfasern der jeweiligen Belastungsart anzupassen; ja, diese Fasern nehmen sogar, dem örtlichen Kräftespiel und dem Gesetze der kleinsten Formänderungsarbeit folgend, die Gestalt von Kurven an.

¹⁾ Nach einem Vortrag, gehalten bei der Tagung der Brückendezernenten der Deutschen Reichsbahn und der Reichsautobahn am 10. März 1937 in Würzburg.

Dabei setzen wir:

$$(2a) \quad \sigma_x = f(y) \sigma_e K,$$

$$(2b) \quad \tau_{xy} = \varphi \sigma_e K,$$

wobei also σ_x dem Spannungsverlauf nach Bild 3a entsprechend von y abhängig ist, während τ_{xy} , welches sich ja in Wirklichkeit nach der Form (Bild 3b) über das Stegblech verteilt, als von y unabhängig, also nach Bild 3c gleichmäßig über das Stegblech verteilt angenommen wird. K bedeutet die vorläufig noch unbekannte „Beulziffer“; σ_e die unter Berücksichtigung der Querdehnung errechnete Knickspannung eines lot-rechten Stegblechstreifens von der Länge b und der Breite t , wobei sich ergibt:

$$(3) \quad \sigma_e = \frac{\pi^2 E J}{1 \cdot b^2 t (1 - \mu^2)}.$$

Die unterstrichenen Glieder der Gl. (1) brauchen wir nicht zu berücksichtigen, das erste, weil es bei der Randbedingung einspannungsfreier Lagerung gleich Null wird, das zweite, weil wir Spannungen senkrecht zur Trägerachse nicht in die Rechnung einführen.

Gl. (1) würde uns in dieser Form kein brauchbares Ergebnis liefern, da bei dem hier angenommenen beliebigen Verlauf der Beulungen unendlich viele Unbekannte w auftreten würden. Wir nehmen daher,

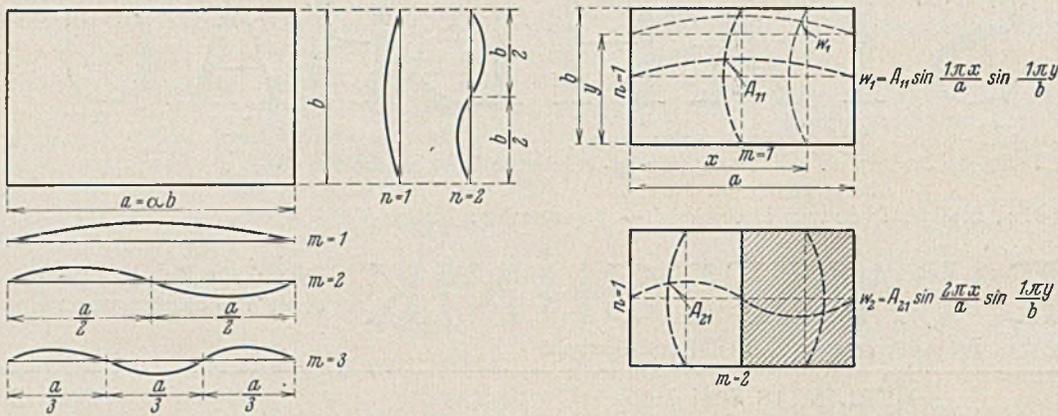


Bild 4. Grundsätzliche Form der Beulwellen.

wie das auch sonst bei Knickaufgaben üblich ist, einen sinusförmigen Verlauf der Beulwellen an und setzen als Annäherung:

$$(4) \quad w = \sum_m \sum_n A_{m,n} \cdot \sin \frac{m \pi x}{a} \cdot \sin \frac{n \pi y}{b}$$

Das bedeutet beispielsweise für $m = 1, 2, 3; n = 1, 2$ die in Bild 4 angedeuteten grundsätzlich möglichen Formen der Wellenbildung in den Längs- und Querschnitten der Platte, die übereinandergelagt zu denken sind.

Bild 5 stellt die sechs Grundverformungen der Platte dar mit den für jeden Einzelfall gültigen Gleichungen für die Ausbeulung w . Die stark ausgezogenen Geraden bleiben in der ursprünglichen Plattenebene liegen; die weiß gelassenen Felder stellen Wellenberge, die schraffierten Felder die entsprechenden Wellentäler dar; dabei ist ohne weiteres ersichtlich, daß die sechs Werte A_{11} bis A_{32} die Höhen der einzelnen Wellenberge bedeuten, also sechs unbekannte Verschiebungen darstellen. Die sechs dargestellten Verformungen mit den unbekannt, später noch zu ermittelnden Wellenberghöhen müssen wir uns nun übereinandergelagert vorstellen; die Addition der angeschriebenen Gleichungen entspricht der Summengl. (4) mit

$$(5) \quad w_1 + w_2 + w_3 + w_4 + w_5 + w_6 = w$$

Von der Summengl. (4) bilden wir nun die nach Gl. (1) erforderlichen Ableitungen $\frac{\partial w}{\partial x}, \frac{\partial w}{\partial y}; \frac{\partial^2 w}{\partial x^2}$ und $\frac{\partial^2 w}{\partial y^2}$ und bilden dann die Doppelintegrale. Wir setzen dann noch

$$(6) \quad a = \alpha b$$

Über die Dimensionen des Ergebnisses sei bemerkt: Bei der Bildung der Ableitungen des ersten Gliedes der Gl. (1) mit den Werten der Gl. (4) erscheint als gemeinsamer Faktor b^{-4} , bei der Bildung der Ableitungen des zweiten Gliedes b^{-2} ; bei der Bildung der Doppelintegrale erscheint in beiden Gliedern als gemeinsamer Faktor b^2 , so daß im ersten Glied b^{-2} übrigbleibt. Da nun im zweiten Glied σ_x und τ_{xy} als lineare Funktionen von $\sigma_e = 1898000 t^2 b^{-2}$ erscheinen, haben im Endergebnis unter Berücksichtigung der außerdem vorhandenen gemeinsamen Faktoren t^3 und t beide Glieder als gemeinsamen Faktor $t^3 b^{-2}$ als von den Abmessungen des Stegblechs abhängige Größe. Außerdem erscheinen in allen Gliedern die Verschiebungsgrößen $A_{m,n}$ in allen möglichen Zusammensetzungen, aber stets im zweiten Grad. Als gemeinsame Dimension erscheint schließlich noch überall kg/cm^2 , im ersten Glied von E , im zweiten Glied von σ_e herrührend, so daß die rechte Seite der Gl. (1), der linken entsprechend die Gesamtdimension $\text{kg} \cdot \text{cm}$ erhält, so daß Gl. (1) schließlich in der allgemeinen Form erscheint:

$$(1a) \quad \mathfrak{X}_i = \frac{t^3}{b^2} \left[\sum_{\substack{m=1,2,3 \\ n=1,2}} A_{m,n} A_{m,n} c_{r m,n} + K \sum_{\substack{m=1,2,3 \\ n=1,2}} A_{m,n} A_{m,n} c_{s m,n} \right] \text{ kg/cm}^2,$$

wobei die Werte $c_{r m,n}$ und $c_{s m,n}$ zum Teil den Faktor α in verschiedenen Graden und außerdem die Werte $c_{s m,n}$ dimensionslose, von der Spannungsverteilung nach Bild 3a abhängige Größen enthalten. Die sechs unbekannt Verschiebungen $A_{m,n}$ sind nun durch die Bedingung der kleinsten Formänderungsarbeit bestimmt, wobei beiläufig bemerkt sei, daß der Satz von der kleinsten Formänderungsarbeit nicht nur für unbekannt Kraftgrößen, sondern auch in gleicher Weise für unbekannt Verschiebungsgrößen gilt. Die sechs unbekannt Verschiebungen sind also durch die Gleichungen bestimmt:

$$(7) \quad \frac{\partial \mathfrak{X}_i}{\partial A_{m,n}} = 0,$$

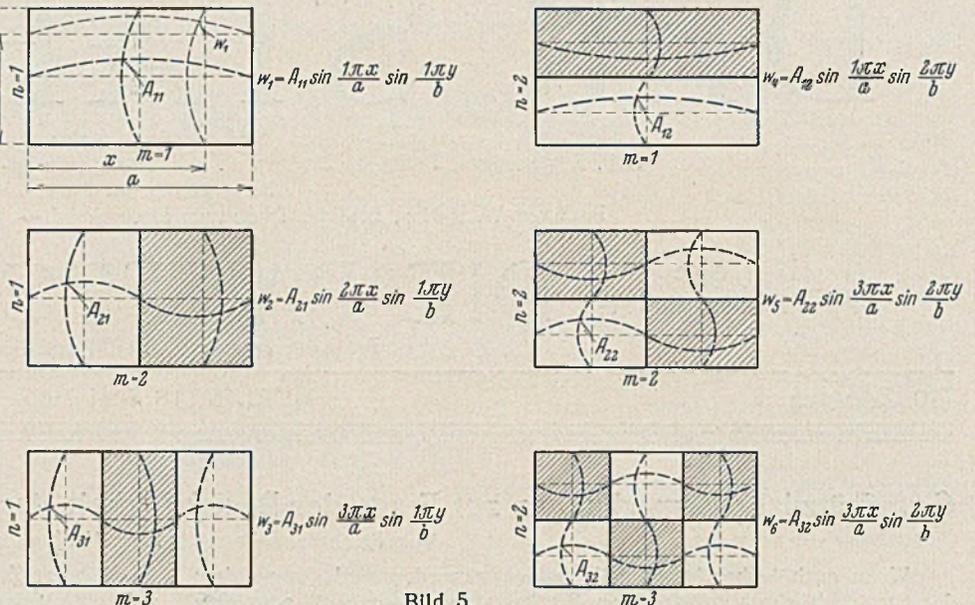


Bild 5.

Teilformen der Ausbeulung mit ihren Gleichungen.

die, wie sich aus Gl. (1a) ergibt, für diese sechs Werte vom ersten Grad und homogen sind, wobei also der gemeinsame Faktor $t^3 b^{-2}$ wegfällt. Die Gleichungen haben die Form:

$$(7a) \quad \begin{cases} f_{11}(\alpha_3 K) A_{11} + f_{12}(\alpha_1 K) A_{12} + f_{13}(\alpha_1 K) A_{21} + f_{14}(\alpha_1 K) A_{22} \\ \quad + f_{15}(\alpha_1 K) A_{31} + f_{16}(\alpha K) A_{32} = 0 \\ f_{21}(\alpha_1 K) A_{11} \dots \dots \dots + f_{26}(\alpha K) A_{32} \\ \quad = 0 \\ \vdots \\ f_{61}(\alpha_1 K) A_{11} \dots \dots \dots + f_{66}(\alpha K) A_{32} \\ \quad = 0 \end{cases}$$

wobei α in verschiedenen Graden, K dagegen nur im ersten Grad erscheint. Aus der Form der Gleichungen ergibt sich ohne weiteres, daß die sämtlichen unbekannt Werte $A_{m,n}$ nur dann von Null verschieden sein können, wenn die Nennerdeterminante der Gl. (7a) gleich Null wird. Sie erscheinen dann sämtlich in der Form:

$$(8) \quad A_{11} \dots \dots \dots A_{32} = \frac{0}{0}$$

Die Nullsetzung der Nennerdeterminante ergibt für K eine Gleichung ersten Grades, deren Lösung den Beulwert K als Funktion von α ergibt, wie er in den Vorschriften in Tafel I, Reihe 2, erscheint. Auf die nach den Vorschriften unter Umständen erforderliche Abminderung der hiernach sich ergebenden Beulspannungen, falls diese im plastischen Bereich liegen, soll hier nicht eingegangen werden.

Bei den mit $K \sigma_e$ sich ergebenden Beulspannungen kann also das Stegblech theoretisch ausbeulen; ich lege aber Wert auf die Feststellung, daß es nicht auszubeulen braucht, denn der Gl. (8) werden auch die Lösungen

$$A_{11} \dots \dots \dots A_{32} = 0$$

gerecht. Das führt nun zu der weiteren wichtigen Feststellung, daß hier ein eigentliches Knickproblem garnicht vorliegt. Verfolgen wir bei dem Fachwerk (Bild 2) einmal den Fall, daß die Knicklast einer Druckstrebe überschritten wird. Diese sucht dann zwar auszubiegen, behält aber dabei, mag sie ausbiegen oder nicht, ihre Knickspannung, und den Rest nimmt unter Aufrechterhaltung der Querkraftbedingung die Zugstrebe auf, soweit sie und das Gesamtfachwerk dieser Spannungumlagerung noch gewachsen ist. Der Augenblick des Ausbiegens ist zwar durch die Knickbedingung der Druckstrebe $y = \frac{0}{0}$ gekennzeichnet; aber in demselben Augenblick befinden wir uns mit Rücksicht auf die Gesamtwirkung des Fachwerks an der Grenze der Gültigkeit der Knickbedingung des Einzelstabes. Für weitere Belastungszunahme hat die Ausbiegung des Stabes nicht mehr den Wert $y = \frac{0}{0}$, sondern y hat für jeden Belastungsfall einen ganz bestimmten, von den Elastizitätsverhältnissen des Gesamtfachwerks abhängigen endlichen Wert, und die weitere Widerstandskraft des Stabes hängt lediglich davon ab, ob durch die Stabkraft und das durch die Ausbiegung bedingte Biegemoment der Stab überbeansprucht wird. Er bricht dann ganz ruhig nach rein statischen Gesetzen, knickt aber nicht.

Genau so arbeitet das Stegblech des Vollwandträgers nach dem Augenblick des Erreichens der Beulspannung. Die Druckfasern (Bild 1) behalten ihre Beulspannung, mehr können sie nun einmal nicht aufnehmen, und die sie senkrecht kreuzenden Zugfasern übernehmen unter Aufrechterhaltung der Querkraftbedingung den Rest; d. h. sie übernehmen ihre eigene zusätzliche Zugspannung und die über die Beulspannung überschießende Spannung der Druckfasern als Zugspannung. Im Augenblick des Überschreitens der Beulspannung fällt nicht etwa der Träger, sondern die Gl. (1) und die daraus gefolgerte Gl. (7a) in sich zusammen; der Träger aber folgt bei seinem weiteren Verhalten anderen Gesetzen. Die Ausbeulungen haben nicht den Wert $\frac{0}{0}$, sondern auch hier von den Elastizitätsverhältnissen des Gesamttragwerks abhängige, ganz bestimmte endliche Werte. Der Träger stürzt nicht plötzlich ein, sondern er kann höchstens bei weiterem Zunehmen der Belastung nach rein statischen Gesetzen zerstört werden; es liegt ein „Stabilitätsproblem“ vor. Gewiß, wir wollen den Zustand des Erreichens der Beulspannung nicht dulden, ebensowenig wie wir bei irgendwelchen Tragwerkteilen das Erreichen der Streckgrenze dulden, aber wir können uns mit verhältnismäßig kleinen Sicherheiten begnügen, wie sie in Tafel II der Vorschriften festgelegt sind. Dazu berechtigt uns aber nur die hier dargelegte Betrachtungsweise.

Die Beulziffern K wurden bisher vollständig und einwandfrei ausgewertet für einfache Spannungszustände, nämlich für reinen Druck, Druck in Verbindung mit Zug, reine Biegung und reinen Schub, wie in Tafel I, Reihe 2, der Vorschriften angegeben; leider aber nicht für zusammengesetzte Spannungszustände, wie sie praktisch fast immer vorkommen; insbesondere nicht für den eigentlich immer vorliegenden Fall: Schub und Biegung. Es ist also von dem zweiten Doppelintegral der Gl. (1) entweder nur das erste oder nur das letzte Glied berücksichtigt worden. Die Auswertung unter gleichzeitiger Berücksichtigung beider Glieder ist nach der hier entwickelten Theorie natürlich ohne weiteres möglich, erfordert aber eine sehr umfangreiche Arbeit, da dann nicht nur verschiedene Seitenverhältnisse, sondern in Verbindung damit verschiedene Verhältnisse $\sigma_x : \tau_{xy} = \varphi$ berücksichtigt werden müßten. Die Auswertung ist zwar erfolgt und in Tafeln niedergelegt²⁾, jedoch nur unter Berücksichtigung der Verformungsmöglichkeiten $m = 1, 2$; $n = 1, 2$ und $m = 1$; $n = 1, 2, 3$. Das ist vielleicht etwas wenig; außerdem tritt aber hier ein weiteres grundsätzliches Bedenken auf. Die Schubspannungen werden nämlich als nach Bild 3c gleichmäßig über die Trägerhöhe verteilt angenommen, während sie in Wirklichkeit nach Bild 3b, nach einer von der Querschnittform abhängigen Kurve verlaufen. Die vereinfachte Annahme gleichmäßiger Verteilung mag bei reiner Schubspannung angehen; bei Schub in Verbindung mit Biegung, dem fast allein praktisch vorkommenden Fall, zeigt ein Blick auf Bild 3a u. 3b, daß die größte Biegespannung mit der kleinsten Schubspannung und die größte Schubspannung mit der Biegespannung Null zusammenfällt. Die Nichtberücksichtigung dieses Umstandes muß zu Ergebnissen führen, die etwas zu ungünstig sind. Da also die theoretisch strenge Lösung leider gerade für den wichtigsten Fall zusammengesetzter Spannungen auf erhebliche Schwierigkeiten stößt, hat man behelfsweise vorläufig folgenden Ausweg gefunden.

Ergibt die Festigkeitsberechnung die Werte σ_1 und τ als Größtwerte, so entspricht diesen gleichzeitig auftretenden Werten die Hauptdruckspannung:

$$(10) \quad \sigma_D = \frac{\sigma_1}{2} + \frac{1}{2} \sqrt{\sigma_1^2 + 4\tau^2}$$

Ihr Neigungswinkel gegen die Stegblechachse ist bestimmt durch:

$$(11) \quad \operatorname{tg} \alpha = \frac{2\tau}{\sigma_1 + \sqrt{\sigma_1^2 + 4\tau^2}}$$

Wann diese Hauptdruckspannung zum Ausbeulen führen kann, wissen wir für die beiden Grenzfälle $\sigma_1 = 0$ und $\tau = 0$, und zwar ist für

$$\sigma_1 = 0: \sigma_{DK} = \tau_K \quad \text{und} \quad \alpha = 45^\circ$$

$$\tau = 0: \sigma_{DK} = \sigma_{1K} \quad \text{und} \quad \alpha = 0.$$

Setzen wir nun mit den vorläufigen unbekanntenen Werten x und y

$$(12) \quad \sigma_{DK}^2 = \frac{\sigma_D^2}{x^2 + y^2},$$

so genügt den für die beiden Grenzfälle geltenden Bedingungen nur die Lösung:

$$x^2 = \frac{\sigma_1^2}{\sigma_{1K}^2}; \quad y^2 = \frac{\tau^2}{\tau_K^2}.$$

Damit ergibt sich als Bedingung für die kritische Hauptdruckspannung:

$$(13) \quad \sigma_{DK} = \frac{1}{2} \cdot \frac{\sigma_1 + \sqrt{\sigma_1^2 + 4\tau^2}}{\sqrt{\frac{\sigma_1^2}{\sigma_{1K}^2} + \frac{\tau^2}{\tau_K^2}}}$$

Die Richtung dieser kritischen Hauptdruckspannung ist natürlich stets durch Gl. (11) gegeben, da wir ein Ansteigen von σ_1 und τ in demselben Verhältnis annehmen. Aus diesem Grunde ergeben sich als die kritischen Teilspannungen:

$$(14) \quad \left\{ \begin{aligned} \sigma_{1K}^* &= \frac{\sigma_1}{\sqrt{\frac{\sigma_1^2}{\sigma_{1K}^2} + \frac{\tau^2}{\tau_K^2}}} \\ \tau_K^* &= \frac{\tau}{\sqrt{\frac{\sigma_1^2}{\sigma_{1K}^2} + \frac{\tau^2}{\tau_K^2}}} \end{aligned} \right.$$

und die Beulsicherheit ist

$$(15) \quad \nu = \frac{1}{\sqrt{\frac{\sigma_1^2}{\sigma_{1K}^2} + \frac{\tau^2}{\tau_K^2}}}$$

wobei, falls abgemindert werden mußte, also für den plastischen Verformungsbereich für σ_{1K} und τ_K die abgeminderten Werte einzusetzen sind.

Diese Ergebnisse entsprechen den neuen Vorschriften. Es muß aber dazu bemerkt werden, daß die hier gegebene Ableitung wohl eine gewisse Anschaulichkeit und Wahrscheinlichkeit für sich hat, da der Fall $\tau = 0$ einen einachsigen Spannungszustand σ , also ohne Überlagerung der Druckfasern durch Zugfasern darstellt, während der andere Grenzfall $\sigma_1 = 0$, also reine Schubspannung, die Kreuzung der Druckfasern durch gleichwertige Zugfasern darstellt und die hier ermittelten Übergangszustände ein allmähliches Anwachsen der kreuzenden Hauptzugfasern vom Grenzwert Null bis zur äußerst möglichen anderen Grenze, der Gleichwertigkeit mit den Druckfasern darstellt, und ein ebenso allmähliches Anwachsen des Neigungswinkels von Null bis 45° . Ein Beweis ist das aber nicht, denn schon in der Annahme der Beziehung (12) liegt eine gewisse Willkür, die zu der „Zauber-Wurzel“

$$\sqrt{\frac{\sigma_1^2}{\sigma_{1K}^2} + \frac{\tau^2}{\tau_K^2}}$$

im Nenner führt, die die wunderbare Eigenschaft besitzt, jeden im Zähler stehenden wirklichen oder auch nur gedachten, aus σ_1 und τ zusammengesetzten Spannungszustand, welcher für die beiden Grenzfälle ein lineares Vielfaches von σ_1 und τ ergibt, in das entsprechende Vielfache von σ_{1K} und τ_K zu verwandeln. Sie dient in den Vorschriften gleichzeitig zur Ermittlung der „Kritischen Vergleichsspannung σ_{DK}^* “. Ferner ist auch hier in Gl. (10) der Wert σ_D aus zwei Teilspannungen σ_1 und τ ermittelt, die an keiner Stelle des Stegbleches gleichzeitig auftreten, wodurch sich ein σ_D ergibt, welches in dieser Größe nirgends auftritt. Vergleiche mit auf Grund genauerer Rechnung erzielten Teilergebnissen haben aber ergeben, daß wir uns mit diesem Näherungsverfahren stets auf der sicheren Seite bewegen, daß also die kritischen Teilspannungen σ_{1K}^* und τ_K^* im allgemeinen etwas zu klein ausfallen. Wir können uns also gerade bei diesen zusammengesetzten Spannungszuständen, wie sie vorwiegend in den den Mittelstützen benachbarten Feldern durchlaufender Träger auftreten, mit kleinen Sicherheiten begnügen, und es besteht kein Anlaß, bei vorhandenen Brücken Verstärkungen vorzunehmen, wenn auch bei der Nachrechnung die in der Tafel II der Vorschriften verlangten Sicherheiten nicht ganz vorhanden sein sollten. Es empfiehlt sich in solchen Fällen wohl, die Frage der Verstärkung mindestens bis zur völligen Klärung der Beulsicherheit bei zusammengesetzten Spannungszuständen hinauszuschieben.

Die in diesen Ausführungen grundsätzlich vertretene Anschauung, welche den Spannungszustand des Stegbleches stets als ein Zusammenwirken der Hauptdruckspannungen und der Hauptzugspannungen auffaßt und vor allem den Verformungszustand beachtet, der nach Überschreitung der Beulspannung eintritt und damit die Grenze der Gültigkeit der aus dem Bryan-Timoschenko-Potential gezogenen Folgerungen festlegt, läßt die Frage der Beulsicherheit als „Stabilitätsproblem“ erkennen. Die Beobachtungen des Verformungszustandes nach Überschreitung der Beulspannung aber führt dann weiter ganz folgerichtig zu dem besonderen Verfahren zur Ermittlung der für Aussteifungen erforderlichen Abmessungen, welches an anderer Stelle bereits dargelegt wurde³⁾.

Eine Nutzenanwendung der vorstehenden, grundsätzlichen Betrachtungen soll an einem der Praxis entnommenen Beispiel erläutert werden.

An einer in der Werkstatt bereits vor Bekanntgabe der Vorschriften fertiggestellten Straßenbrücke wurde das Feld neben der Mittelstütze eines durchlaufenden Trägers nach den neuen Vorschriften untersucht (Bild 6). Es ist durch eine waagerechte Stelpe ausgesteift, St 37.

²⁾ Stein, Stahlbau 1936, Heft 8.

³⁾ Stahlbau 1937, Heft 9, S. 65.

Die Festigkeitsberechnung ergab:

$$\begin{aligned} \varphi \cdot \max Q &= 112,6 \text{ t} \\ \text{dazugehörig } \varphi M &= 274,42 \text{ tm} \\ J &= 130\,061 \text{ cm}^4, \end{aligned}$$

damit ist:

$$\begin{aligned} \sigma_1 &= \frac{2\,742\,000 \cdot 56,5}{1\,300\,601} = 1193 \text{ kg/cm}^2 \\ \sigma_2 &= \frac{1193}{3} = 398 \text{ kg/cm}^2 \\ \tau &= \frac{112\,600}{113 \cdot 1,2} = 830 \text{ kg/cm}^2. \end{aligned}$$

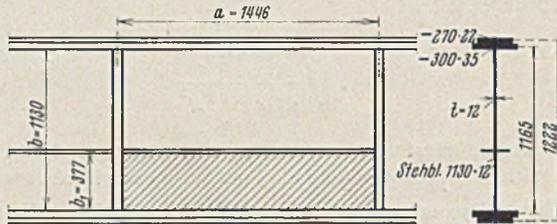


Bild 6. Beispiel für Biegung und Schub.

Nach Vorschrift b 1 ist

$$\sigma_e = 1\,898\,000 \left(\frac{1,2}{37,7} \right)^2 = 1920 \text{ kg/cm}^2.$$

Nach Tafel I, Sp. 1 u. 4, ist mit

$$\alpha = \frac{144,6}{37,7} = 3,83 > 1; \quad \alpha^2 = 14,7$$

für σ_1 :

$$\begin{aligned} K &= \frac{8}{1 + \psi} \cdot F(\psi) \\ \psi &= \frac{\sigma_2}{\sigma_1} = \frac{398}{1193} = 0,33 \\ F(\psi) &= 1 - \left(0,01 + \frac{0,015}{14,7} \right) \left(\frac{1 - 0,33}{1 + 0,33} \right)^2 = 0,9972 \end{aligned}$$

$$K = \frac{8}{1 + 0,33} \cdot 0,9972 = 6,0;$$

für τ :

$$K = 5,34 + \frac{4,00}{14,7} = 5,61$$

$$\sigma_{1K} = 6,0 \cdot 1920 = 11\,550 \text{ kg/cm}^2$$

$$\tau_K = 5,61 \cdot 1920 = 10\,800 \text{ kg/cm}^2,$$

damit wird nach (3):

$$\sigma_{vK} = \frac{\sqrt{1193^2 + 3 \cdot 830^2}}{\sqrt{\left(\frac{1193}{11\,550} \right)^2 + \left(\frac{830}{10\,800} \right)^2}} = \frac{\sqrt{1\,425\,000 + 2\,070\,000}}{\sqrt{0,01\,068 + 0,00\,591}} = \frac{1870}{0,129}$$

$$\sigma_{vK} = 14\,500 \text{ kg/cm}^2 > 2073.$$

Abminderung nach 3b:

$$\lambda = \frac{4550}{\sqrt{\sigma_{vK}}} = \frac{4550}{\sqrt{14\,500}} = 37,8.$$

$$\sigma_{v'K} = 2400 \text{ kg/cm}^2 \text{ (BE, Bild 43),}$$

Damit ergeben sich als Beulspannungen:

$$\sigma_{1K}^* = \frac{2400}{14\,500} \cdot \frac{1193}{0,129} = 1531 \text{ kg/cm}^2$$

$$\tau_K^* = \frac{2400}{14\,500} \cdot \frac{830}{0,129} = 1063 \text{ kg/cm}^2$$

$$\nu = \frac{1531}{1193} = \frac{1063}{830} = 1,28 (< 1,4).$$

Damit haben wir nur 1,28 Sicherheit gegen Fließgefahr, denn der Zustand des Eintretens des Fließens war nach dem Ergebnis von σ_{vK} für σ_{1K} und τ_K maßgebend. Das wäre bedenklich. Eine Überlegung bzw. genauere Untersuchung wird aber zeigen, daß tatsächlich größere Sicherheit vorhanden ist. Nach genauerer Berechnung ist an der unteren Stegblechkante nach der bekannten Formel

$$\tau = \frac{SQ}{Jt}$$

$$\text{mit } S = 27 \cdot 2,2 \cdot \frac{1222}{2} + 30 \cdot 3,5 \cdot \frac{1165}{2} = 96\,760 \text{ cm}^3$$

$$\tau = \frac{96\,760 \cdot 112\,600}{1\,300\,601 \cdot 1,2} = 695 \text{ kg/cm}^2;$$

an der waagerechten Steife kommt zu S noch hinzu:

$$S' = \frac{113}{3} \cdot 1,2 \cdot \frac{113}{3} = 1700 \text{ cm}^3,$$

also ist hier:

$$\tau = \frac{98\,460 \cdot 112\,600}{1\,300\,601 \cdot 1,2} = 706 \text{ kg/cm}^2.$$

Das ist das größte, in dem untersuchten Stegblechfeld überhaupt vorkommende τ .

Wir können daher mit einem gleichmäßig über das untersuchte Feld verteilten

$$\tau = \frac{695 + 706}{2} \approx 700 \text{ kg/cm}^2$$

rechnen, ohne gegen die Theorie zu verstoßen.

Dann wird aber:

$$\sigma_{vK} = \frac{\sqrt{1193^2 + 3 \cdot 700^2}}{\sqrt{\left(\frac{1193}{11\,550} \right)^2 + \left(\frac{700}{10\,800} \right)^2}} = \frac{\sqrt{1\,425\,000 + 1\,470\,000}}{\sqrt{0,010\,68 + 0,004\,19}}$$

$$\sigma_{vK} = \frac{1700}{0,122} = 13\,910 \text{ kg/cm}^2 > 2073.$$

Die Abminderung ergibt wieder:

$$\sigma_{vK}^1 = 2400 \text{ kg/cm}^2.$$

Also:

$$\sigma_{1K}^* = \frac{2400}{13\,910} \cdot \frac{1193}{0,122} = 1690 \text{ kg/cm}^2$$

$$\tau_K^* = \frac{2400}{13\,910} \cdot \frac{700}{0,122} = 990 \text{ kg/cm}^2$$

$$\nu = \frac{1690}{1193} = \frac{990}{700} = 1,414 > 1,4,$$

was als ausreichend angesehen werden kann.

Die Belassung des bereits hergestellten Zustandes ist also wohl unbedenklich, denn es liegt ein besonderer Fall vor, in welchem die verhältnismäßig dicken Gurtplatten einen nennenswerten Anteil der Gurtkraft übernehmen, andererseits zu einer fast gleichmäßigen Verteilung der restlichen Querkraft über das hier untersuchte Feld führen.

Selbstredend sollen aber neu herzustellende Brücken streng nach den Vorschriften berechnet werden, die unter a 5 vorschreiben, daß τ unter der Annahme zu berechnen ist, daß die Querkraft über die ganze Stegblechhöhe gleichmäßig verteilt ist.

Alle Rechte vorbehalten.

Wurzelfehler bei Stumpfnähten an geschweißten Stahlüberbauten.

Von Wolfgang Kolb.

(Mitteilung der Reichs-Röntgenstelle beim Staatlichen Materialprüfungsamt Berlin-Dahlem, Zweigstelle Nürnberg.)

In einer früheren Veröffentlichung¹⁾ wurden grundlegende Mitteilungen über die Röntgenprüfung von Schweißnähten, insbesondere im Stahlbau, gemacht. Unterdessen haben die Reichs-Röntgenstelle beim Staatlichen Materialprüfungsamt Berlin-Dahlem und ihre Zweigstellen im Reich in Gemeinschaft mit den Obersten Bauleitungen der Kraftfahrbahnen die Röntgen-Werkstoffprüfung in umfassendem Maße zur Überwachung der Montage geschweißter Stahlüberbauten eingesetzt. Dabei wurde eine Reihe wertvoller Erkenntnisse gewonnen, die gelegentlich mitgeteilt werden sollen, um einerseits an der Vorbereitung verfahrensmäßiger Verbesserungen mitzuhelfen, andererseits die ausführenden Firmen zu eigenen weiteren Beobachtungen anzuregen.

¹⁾ R. Berthold, Die Prüfung von Schweißnähten, Stahlbau 1936, Heft 4.

Im folgenden wird über eine in verschiedenen Spielarten auch bei angeblich sorgfältigster Ausführung zur Überraschung der Hersteller immer wieder auftretende Fehlererscheinung, den sog. Wurzelfehler bei Stumpfnähten und seine Ursachen, berichtet. Es kann sich dabei sowohl um Hohlräume handeln als auch um Schlackeneinschlüsse oder Kaltschweißstellen (Bindungsfehler). Gemeinsam ist diesen Fehlern, daß sie in der Nahtwurzel, dem Ausgangspunkt der Schweißung, oder wenigstens in deren unmittelbarer Nähe zu suchen sind.

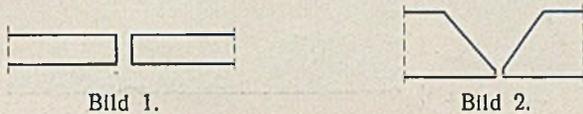
A. Stumpfnähte ohne Abschrägung der Nahtflanken.

Von untergeordneter Bedeutung sind im allgemeinen Schweißverbindungen nach Bild 1, die nur für kleine Blechdicken bei geringer Beanspruchung in Frage kommen. Die Nahtflanken werden nicht abgeschrägt. Der Vollständigkeit halber sei diese Verbindungsart hier erwähnt, zumal

Gelegenheit gegeben war, an einem Bauwerk hochbeanspruchte Zugstäbe (Flachstäbe St 37; 70 mm breit, durchschnittlich 10 mm dick) zu untersuchen, die in fehlerhafter Weise nach Bild 1 anstatt als X-Nähte nach Bild 3 geschweißt waren.

Die Schweißung wurde senkrecht mit Schmelzmantelelektroden ausgeführt, der Abstand der Stoßenden betrug durchschnittlich 3 bis 4 mm, war allerdings in einzelnen Fällen auch wesentlich größer.

Der Röntgenbefund ergab fast bei allen so geschweißten Zugstäben erhebliche Schlackeneinschlüsse zwischen den Stoßenden (Bild 6²⁾. Die Einschlüsse hätten immerhin teilweise vermieden werden können, wenn nach Fertigstellung der einen Nahtseite wenigstens von der anderen Nahtseite her ausgekreuzt worden wäre. Die größtenteils von der Elektrodenumhüllung herrührende geschmolzene Schlacke setzte sich vor allem bei den Stößen mit abnormal großer Fugenbreite zwischen den Nahtflanken fest und wurde vom Elektrodenwerkstoff einfach überdeckt. Die Schwächung der Naht war dadurch teilweise so erheblich, daß infolge von Schrumpfspannungen (die durch unzweckmäßige Schweißfolge hervorgerufen waren), an einzelnen Schweißungen durchgehende Ribbildungen eintraten (*R* in Bild 7), noch ehe die Zugstäbe überhaupt belastet wurden. Bild 8 gibt zum Vergleich die Röntgenaufnahme einer der ausgebesserten, nachträglich als X-Naht ausgeführten einwandfreien Zugstabschweißungen wieder.



B. V-Nähte, wurzelseitig nicht nachgeschweißt.

Bei Blechdicken über höchstens 5 mm, die nur geringer Beanspruchung unterworfen sind, kommt im allgemeinen die wurzelseitig nicht nachgeschweißte V-Naht (Bild 2) zur Anwendung. Diese Nähte brauchen an sich nach den „Vorläufigen Vorschriften für geschweißte, vollwandige Eisenbahnbrücken“ und den „Vorschriften für geschweißte, vollwandige, stählerne Straßenbrücken DIN-Entwurf 1. E 4101³⁾“ als Stumpfnähte II. Güte nicht geröntgt zu werden. Immerhin ist in den Ausführungsbestimmungen der „Vorschriften“ darauf hingewiesen, daß die Bindung zwischen Schweißwerkstoff und Mutterwerkstoff bei allen Schweißnähten auch im Scheitel der Naht einwandfrei sein soll, d. h. also, daß die Naht gut durchgeschweißt werden muß, ohne daß allerdings eine Nachschweißung der Wurzel bei Nähten II. Güte verlangt wird.

Als schlecht sind demnach Verbindungen nach Bild 9 anzusprechen, bei denen die Wurzel völlig unverschweißt geblieben ist. Nicht selten findet man, daß ein solcher Wurzelfehler sich in der Röntgenaufnahme nicht in der bekannten Weise als scharfe schwarze Linie, sondern im Gegenteil als Aufhellung abzeichnet. Bei solchen Nähten wurde die unverschweißte Wurzel beim ersten Anstrich der Brücke mit Bleimennige⁴⁾ ausgefüllt, so daß der Fehler bei einer rein äußerlichen Besichtigung nicht entdeckt werden konnte.

C. V-Nähte, wurzelseitig nachgeschweißt, X- und U-Nähte als Schweißverbindungen I. Güte.

Wurzelfehler müssen im allgemeinen sorgfältig ausgebessert werden, sobald es sich um Schweißnähte I. Güte handelt, denn die durch Wurzelfehler hervorgerufene innere Kerbwirkung vermag vor allem die Dauerfestigkeit der Schweißverbindung erheblich herabzusetzen⁵⁾. Die drei Nahtformen (Bild 2 bis 4) können hinsichtlich des Auftretens von Wurzelfehlern gemeinsam behandelt werden, da der Arbeitsvorgang in der Nahtwurzel fast immer derselbe ist: Nach völliger oder teilweiser Fertigstellung der einen Nahtseite wird der Stoß von der anderen Nahtseite her so weit ausgekreuzt, daß der gesamte durch den Nahtscheitel durchgeschmolzene Schweißstoff entfernt und die Zone gesunder Verbindung zwischen Mutterwerkstoff und Schweißwerkstoff hinter dem Nahtscheitel erreicht wird. Dann wird bei den V- und U-Nähten die Wurzel nachgeschweißt, bei X-Nähten die zweite Nahthälfte ganz oder teilweise fertiggestellt.

Bei ungenügender Durchschweißung (z. B. bei Verwendung zu dicker Elektroden für die erste Lage) bzw. mangelnder Auskreuztiefe treten im allgemeinen drei verschiedene Arten von Wurzelfehlern auf, die in den Bildern 11 bis 13 schematisch dargestellt und in den Röntgenbildern wiedergegeben sind (Werkstoff: St 37; Walzblech, 14 mm dick).

Bei zusammengepreßten, im Nahtscheitel nicht bis zur Spitze abgeschrägten Stoßenden bleibt in der Wurzel ein schmaler, unverschweißter Spalt bestehen, der sich im Röntgenbild als gerade, scharfe Linie unterschiedlicher Schwärzung kennzeichnet (Bild 11).

Bei größerem Abstand der Stoßenden füllt sich die im Nahtscheitel entstehende Fuge mehr oder weniger mit Schlacke, im Röntgenbild als dunkles, unregelmäßig geschwärmtes Band erkenntlich (Bild 12).

Es kann ferner vorkommen, daß der Schweißwerkstoff die Scheitelfuge zwar völlig durchdringt, diese aber nur ungenügend aufgeschmolzen wird. Dann kommt dort eine homogene Verbindung zwischen Schweißwerkstoff und Mutterwerkstoff nicht mehr zustande. Es entstehen zwei parallel nebeneinander herlaufende feine Bindungsfehler, deren Abstand ungefähr gleich der Fugenbreite ist (Bild 13).

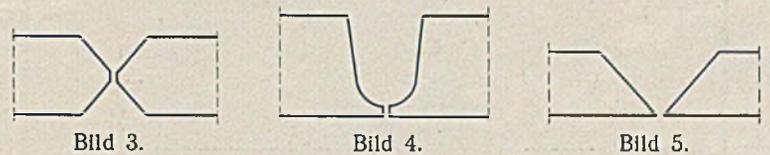
In Bild 10 ist zum Vergleich wiederum die Röntgenaufnahme einer einwandfreien X-Naht wiedergegeben. Die Bilder 14 u. 15 zeigen entsprechende Fehlererscheinungen bei V-Nähten (Gurtblechschweißungen, St 37; Walzblech, 24 mm dick).

Die günstigste Stoßentfernung beträgt erfahrungsgemäß etwa 3 bis 4 mm. Bei größeren Stoßentfernungen (in manchen Fällen schlechter Zurechtung mußten Spalte bis zu 12 mm Breite durch die ersten Lagen überbrückt werden) sollte die erste Lage nicht mit den im Brückenbau im allgemeinen verwendeten Schmelzmantelelektroden geschweißt werden, da das Schmelzbad wegen seiner Dünflüssigkeit leicht durchsackt und der Spalt sich wegen des gleichzeitigen Aufschmelzens und Abtropfens der Nahtflanken noch verbreitern würde. Das nicht immer durchführbare Unterlegen einer Kupferplatte ermöglicht zwar bei geschickter Elektrodenführung auch ein Schließen größerer Fugen mit Schmelzmantelelektroden, es entsteht aber dabei ein sehr breites, dünnflüssiges Schmelzbad mit großer Querschrumpfung.

Es ist in diesem Falle zu empfehlen, zur Schweißung der ersten Lagen bis zur Schließung der übermäßig großen Nahtfuge blanke oder leicht getauchte, abgenommene Elektroden zu verwenden. Diese ergeben ein dicker flüssiges und rascher erstarrendes Schmelzbad. Nicht selten benutzt der Schweißer dazu blanke, nicht abgenommene Elektroden, im guten Glauben, diesen geringwertigeren Werkstoff beim rückwärtigen Auskreuzen wieder entfernen zu können und damit doch den „Vorschriften“ zu genügen, die zur gesamten Bauausführung nur geprüfte und abgenommene Schweißdrahtsorten zulassen. Daß dies nicht ohne weiteres gelingt, zeigt Bild 16, eine einzige von vielen ähnlich aussehenden Röntgenaufnahmen gleichartiger Schweißungen. Die erste Lage ist schlecht durchgeschweißt und vor allem von starken Schlackeneinschlüssen durchsetzt, die durch das Auskreuzen nur zu einem ganz geringen Teil entfernt worden waren.

Es ist zweckmäßig, für alle Montagearbeiten, bei denen sonst Schmelzmantelelektroden verwendet werden, immer eine Anzahl abgenommener, nicht umhüllter Elektroden (z. B. Seelenelektroden) bereitzuhalten. Wichtig ist vor allem, daß die Schweißer in der Lage sind, beide Elektrodenarten einwandfrei zu verarbeiten.

Es wird gelegentlich vorgeschlagen, auf das Brechen der Kanten im Nahtscheitel ganz zu verzichten und die Bleche an der Abschrägung scharf auszuhobeln (Bild 5). Bei Verwendung von Schmelzmantelelektroden besteht aber die Gefahr zu starken Durchschmelzens und Durchsackens des Schmelzbades. Dadurch wird der auch im Interesse der Vermeidung allzu großer Schrumpfungerscheinungen erstrebenswerte gleichmäßige Fortgang der Schweißung erschwert. Wenn grundsätzlich auf genügend tiefes Auskreuzen geachtet wird, verliert diese Frage an Bedeutung.



Noch ein Wort zur Praxis des Auskreuzens, dessen richtige Ausführung auf der Baustelle häufig dem Ermessen des Schweißers allein überlassen bleibt. Das Grundrezept des Schweißers lautet: Es muß so lange ausgemeißelt werden, bis der Span sich nicht mehr teilt (bei einer Nahtform nach Bild 11 oder 13) oder bis die ausgekreuzte Stelle nicht mehr „staubt“. Der „Staub“ rührt bei einer Schweißverbindung nach Bild 12 von der durch die Meißelhebe zertrümmerten Schlacke her. Dies richtig zu beurteilen, setzt natürlich große Übung voraus. Selbst erfahrene Schweißer sind vor Täuschungen und Irrtümern nicht sicher, sobald z. B. Schlackeneinschlüsse, Hohlräume und Kaltschweißstellen in der Nahtwurzel bei Verwendung stumpfer Werkzeuge zugestemmt oder beim Ausschleifen mit ungeeigneten Schleifscheiben zugeschmiert werden. Obwohl der Fehler noch in der Nahtwurzel vorhanden ist, hat der Schweißer doch den Eindruck, daß die Wurzel einwandfrei gesäubert sei. Es überrascht, des öfteren feststellen zu müssen, daß die Schweißer auf den Baustellen oft nur recht mangelhaft mit Werkzeugen ausgerüstet sind und nicht selten gar keine Möglichkeit besteht, die Meißel einwandfrei nachzuschleifen und nachzuhärten.

Um die Gefahr ungewollten Zustehens von Fehlern in der Nahtwurzel möglichst einzuschränken, ist eine Firma dazu übergegangen, diese zunächst im Groben auszukreuzen, den letzten Span aber mit einem tragbaren Fräsgesetz mit biegsamer Welle und Formfräser wegzunehmen.

²⁾ In den Bildern bedeuten: *W* = Wurzelfehler mit Schlacke, *R* = Ribbildung, *E* = Einbrandkerbe, *B* = Bindefehler, *S* = Schlacke.

³⁾ Elektroschweißung, Jahrg. 7, 1936, S. 128.

⁴⁾ Schwermetalle und Schwermetallverbindungen schwächen die Röntgenstrahlung mehr als z. B. gleiche Schichtdicken von Stahl.

⁵⁾ Graf, Stahlbau, Bd. 6, 1933, S. 81.

Bildtafel I.

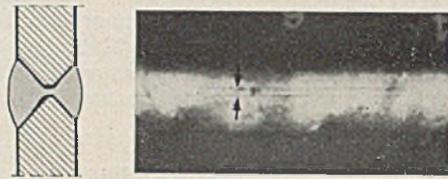


Bild 13.

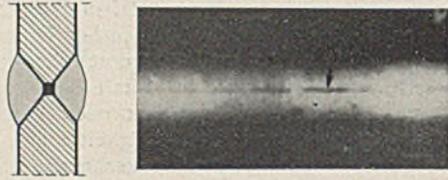


Bild 12.



Bild 11.

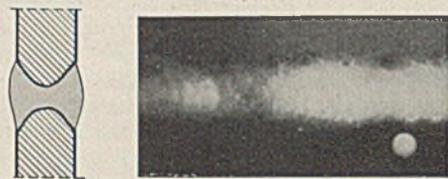


Bild 10.



Bild 9.



Bild 8.

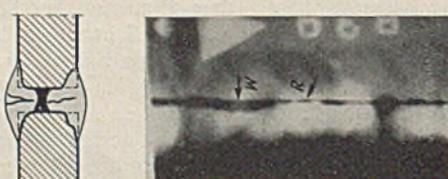


Bild 7.



Bild 6.

Bildtafel II.

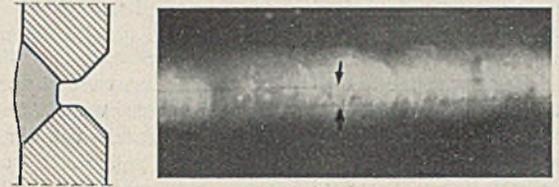


Bild 19.

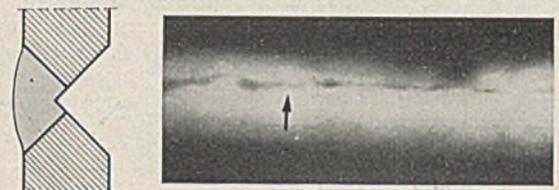


Bild 18.

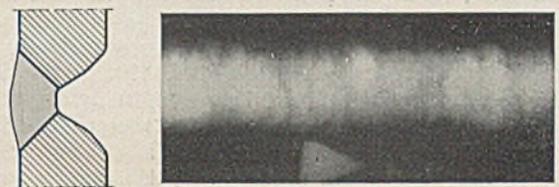


Bild 17.

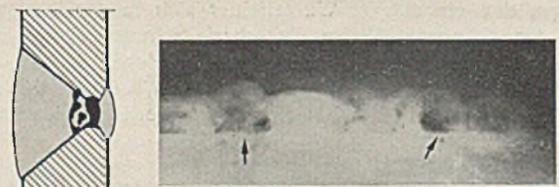


Bild 16.

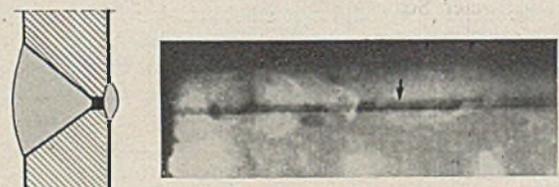


Bild 15.

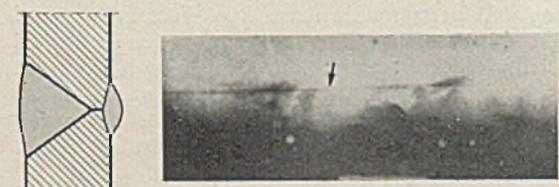
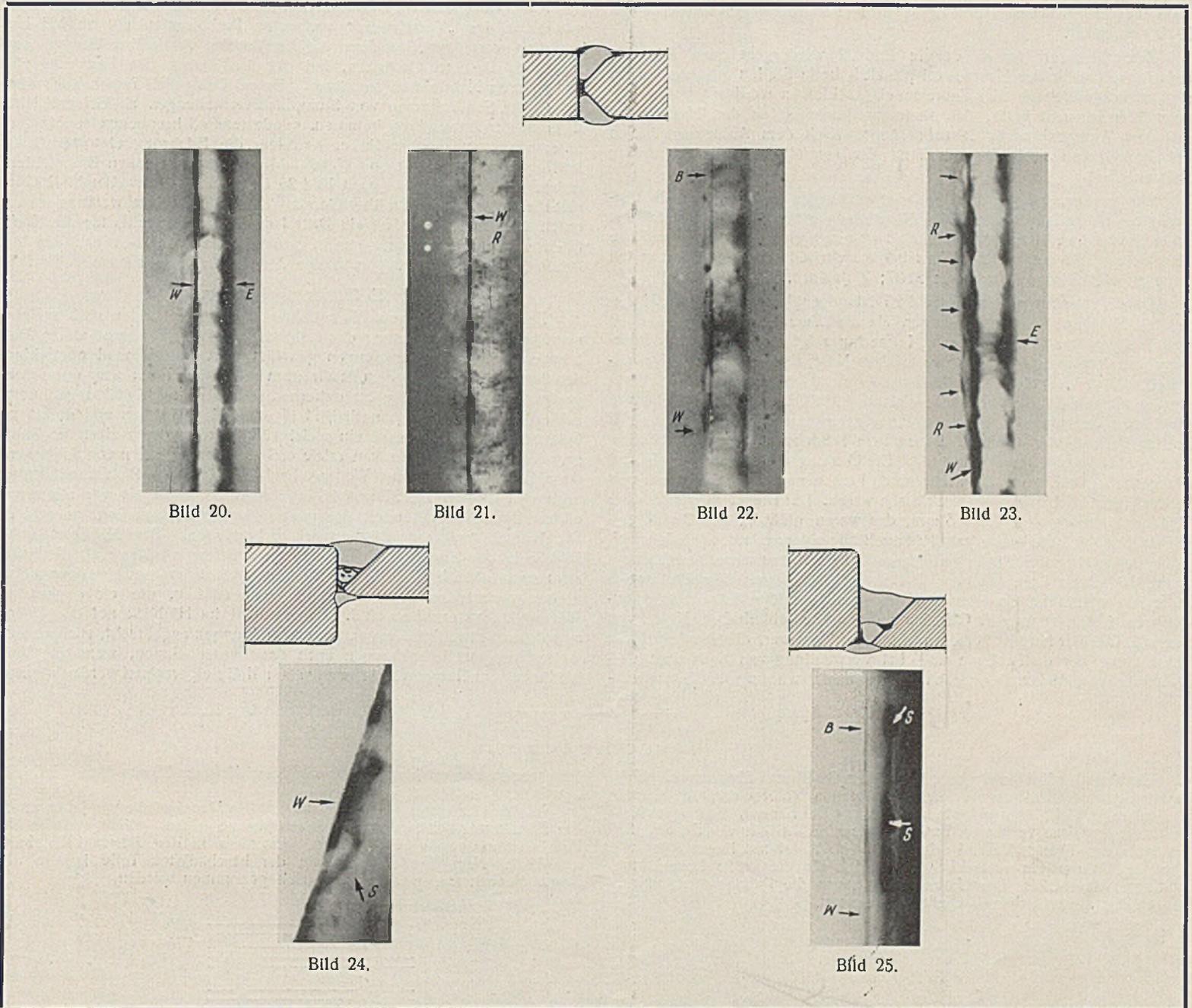


Bild 14.

Bildtafel III.



Der etwas größere Arbeitsaufwand machte sich durch Erzielung sehr sauberer, fehlerfreier Schweißungen und Vermeidung von Nacharbeiten bezahlt. Andere Firmen teilen mit, daß sie mit dem Nachschleifen der ausgekreuzten Stellen, vor allem auch bei Ausbesserungen, ausgezeichnete Ergebnisse erzielt haben. Ob nun nachgefräst oder nachgeschliffen wird, in beiden Fällen hängt der Enderfolg der Arbeit in erster Linie von der einwandfreien Beschaffenheit der verwendeten Werkzeuge ab.

Das Nachfräsen oder Nachschleifen hat aber noch einen weiteren Vorzug. Die Form der zum Auskreuzen verwendeten Meißel und damit die Form der entstandenen Mulde in der Nahtwurzel ist nämlich nicht ohne Bedeutung für die Güte der Wurzelverschweißung. Gelegentlich wird versucht, mit einem Spitzmeißel oder mit einem Nutenmeißel die Nahtwurzel möglichst schnell herauszunehmen. Im ersteren Fall ergibt sich eine Spitzkerbe oder es entstehen bei breiterem Auskreuzen einzelne nebeneinanderliegende mehr oder weniger tiefe Riefen. Bei Verarbeitung von Schmelzmantelelektroden, vor allem von solchen mit ungleichmäßiger Umhüllung, kann es vorkommen, daß diese Riefen oder Kerben durch den vorfließenden Schlackenfluß ausgefüllt und bei ungenügendem Aufschmelzen durch den Lichtbogen vom Schweißwerkstoff überdeckt werden. Es entstehen dann Schlackenzeilen, wie sie Bild 18 zeigt. Ähnlich zeichnen sich zugestemmte Schlackeneinschlüsse im Röntgenbild ab. Die nach Bild 19 ausgestemmte Nute gibt ähnlich wie bei der in Bild 13 dargestellten Schweißverbindung leicht zu Bindungsfehlern an einer oder beiden senkrechten Nahtflanken Anlaß.

Eine nach Bild 17 ausgekreuzte Naht, eine leicht ausgerundete, nach außen sich öffnende Mulde ohne Kerben und Riefen ist erfahrungsgemäß am günstigsten. Das läßt sich aber gerade bei Entfernung des letzten

Spans mit geeigneten Formfräsern oder Schleifscheiben verhältnismäßig leicht erreichen.

D. Sonderformen von Stumpfnahverbindungen.

Zu den Stumpfnahschweißungen können noch einige Sonderformen gezählt werden, wie sie gelegentlich z. B. zum Einschweißen von Querträgern, Konsolen u. a. bei Stahlüberbauten zur Anwendung kommen. Für Stegblechschweißungen ist eine Nahtform nach Bild 20, die sogenannte K-Naht, bekannt, zum Anschluß von Querträgergurtblechen an die meist dickeren Hauptträgergurtbleche Nahtformen nach Bild 24 u. 25. Gemeinsam ist diesen Ausführungsarten, daß eine der beiden Nahtflanken nicht abgeschragt wird. Sofern eine lastverteilende Wirkung der Querträger bei der Berechnung des Bauwerks berücksichtigt ist, wird im allgemeinen neben sonstiger einwandfreier Ausführung der Naht eine sorgfältige Verschweißung der Nahtwurzel verlangt.

Eine Reihe von Röntgenuntersuchungen an K-Nähten an einem größeren Bauwerk (Werkstoff: St 37; Walzblech, 14 mm dick) ergab, daß neben schlechter Wurzelverschweißung und starken Einbrandkerben in zahlreichen Fällen an der senkrechten Nahtflanke Bindungsfehler nachzuweisen waren, die, wie bei der Öffnung dieser Nähte festgestellt wurde, fast alle in Wurzelnähe lagen und in den Wurzelfehler direkt übergingen. Die Nähte waren auch hier so sehr durch die Schweißfehler geschwächt, daß starke Ribbildungen, insbesondere in der Zugzone der Schweißnähte, auftraten, deren Verlauf meistens durch die als Kerbe wirkenden Wurzel- und Bindungsfehler erzwungen war, was zu einem geradlinigen Durchreißen der Nähte in der Ebene der senkrechten Nahtflanke führte (Bild 21). Nur in wenigen Fällen ging der Ribverlauf aus dieser Ebene heraus und

folgte dann der am Übergang von Schweißnaht zum Mutterwerkstoff entstandenen Einbrandkerbe (Bild 23). Alle diese Schweißungen wurden durch X-Nähte ersetzt.

Bemerkenswert ist an der in Bild 22 wiedergegebenen Röntgenaufnahme, daß in der Nahtwurzel plötzlich helle Stellen auftreten. Dort sind zurückgebliebene Mennigereste eingeschlossen worden, obwohl der Schweißer versucht hatte, den Bleimennigeanstrich an den Nahtflanken mit dem Autogenbrenner „abzubrennen“. Nach dem Abbrennen hätten die Nahtflanken noch abgeschliffen oder sorgfältig abgekratzt werden müssen.

Ein grober, an gleichartigen Schweißungen verschiedentlich festgestellter Wurzelfehler ist in Bild 24 wiedergegeben. Neben der äußerst schlecht verschweißten Nahtwurzel sind weitere breite Schlackeneinschlüsse zu erkennen, die wegen ihrer Wurzelnähe zwischen der ersten und zweiten Lage zu suchen sind (Werkstoff: St 37; Walzblech, 16/30 mm dick).

Eine Verbindungsart nach Bild 25 ist gegenüber der in Bild 24 gezeigten Nahtform insofern günstiger, als die Wurzel leichter ausgekreuzt und nachgeschweißt werden kann. Immerhin zeigt die in Bild 25 wiedergegebene Röntgenaufnahme einer solchen Naht, daß schwere Fehler auftraten, die selbst bei tieferem Auskreuzen nicht vollständig hätten entfernt werden können (Werkstoff: St 37; Walzblech, 16/33 mm dick). Die ganze Naht wird von einem starken Bindungsfehler durchzogen, der in einen breiten Wurzelfehler ausläuft. Neben dem Bindungsfehler zieht sich eine breite und tiefe Schlackenrinne hin. Die Öffnung dieser Naht ergab, daß die ganze erste Lage an der senkrechten Flanke nur „angeklebt“ war und in der Wurzel Schlacken eingeschlossen waren. Der Bindefehler hatte eine Tiefenausdehnung von 4 bis 5 mm, das waren rd. 30% der Querträger-Gurtblechstärke. Die breite, parallel zum Bindefehler verlaufende Schlackenrinne wurde als mit Schlacke gefüllte und nachher überschweißte Einbrandkerbe der ersten Lage erkannt. Es fiel auf, daß diese Fehler reihenweise auftraten, während entsprechende Nähte an anderen Querträgerreihen vollkommen fehlerfrei waren. Offenbar wurden die fehlerhaften Nähte von einem Schweißer hergestellt, der nicht in der Lage war, die gerade bei der Schweißung der ersten Lage und bei Verwendung von Schmelzmantelelektroden verhältnismäßig starke magnetische Blaswirkung der Gleichstrom-

Lichtbogenschweißung zu meistern. Es ist deshalb anzustreben, daß vor der Ausführung eines geschweißten Stahlüberbaues die Schweißer nicht nur die in den „Vorschriften“ verlangten Probestücken einwandfrei herzustellen vermögen, sondern darüber hinaus Probeschweißungen entsprechend den schwierigeren, bei der Ausführung des Bauwerks vorkommenden Nahtformen ausführen. Es empfiehlt sich ferner, auch dort, wo solche Sonderformen von Stumpfnähtverbindungen als Schweißnähte II. Güte zur Anwendung kommen, mindestens stichprobenweise Röntgenuntersuchungen durchzuführen, nachdem die Erfahrung eine verhältnismäßig große Häufigkeit von Wurzelfehlern und wurzelnahen Bindefehlern ergab. Eine Schweißnaht nach Bild 25 ist selbst als Schweißnaht II. Güte nicht mehr brauchbar, da über die mangelnde Wurzelverschweißung hinaus durch den Bindefehler fast ein Drittel des Nahtquerschnitts für die Kraftübertragung unbrauchbar gemacht wurde, ganz abgesehen von den örtlichen Spannungserhöhungen infolge der Kerbwirkung solcher Fehler.

E. Zusammenfassung.

Zur Vermeidung von Wurzelfehlern bei Stumpfnähten muß auf einwandfreie Durchschweißung des Nahtscheitels bzw. genügend tiefes Auskreuzen mit guten Werkzeugen geachtet werden. Es wird empfohlen, den letzten Span nach dem Auskreuzen mit einem Formfräser oder einer geeigneten Schleifscheibe zu entfernen, um eine nach außen geöffnete, gut ausgerundete Mulde nach Bild 17 ohne Meißelkerben und Riefen zu bekommen. Dadurch wird ein gleichmäßig gutes Aufschmelzen des Nahtgrundes und der Nahtflanken erleichtert und das Auftreten von Schlackeneinschlüssen vermindert. Wo aus baulichen Gründen Sondernahformen nach den Bildern 20, 24 und 25 unvermeidlich sind, ist vor allem auf einwandfreie Beschaffenheit der ersten eingeschweißten Lage zu achten. Die Wurzel muß sorgfältig ausgekreuzt werden. Die Nahtform nach Bild 25 ist für eine saubere Wurzelverschweißung günstiger als die Nahtform nach Bild 24. Die mit der Ausführung beauftragten Schweißer sollen vorher gleichartige Probeschweißungen herstellen, die einer genauen Prüfung zu unterziehen sind. Es erscheint im Hinblick auf die bisher an solchen Schweißnähten gemachten Erfahrungen angebracht, stichprobenweise Röntgenuntersuchungen auch dann vorzunehmen, wenn die Verbindungen zur Gruppe von Schweißnähten II. Güte gerechnet werden können.

Verschiedenes.

Umbau der Kettenhängebrücke über die Menai-Meerenge. Einer Ankündigung des britischen Verkehrsministeriums zufolge soll die bekannte Kettenhängebrücke über die Menai-Meerenge bei Bangor, die England mit der Insel Anglesea verbindet, umgebaut werden. Die in den Jahren 1819 bis 1826 von Thomas Telford erbaute Brücke bietet mit ihrem Alter von über 110 Jahren ein vortreffliches Beispiel für die große Lebensdauer stählerner Bauwerke. Der Umbau erfolgt, um die Brücke den Anforderungen des neuzeitlichen Verkehrs anzupassen.

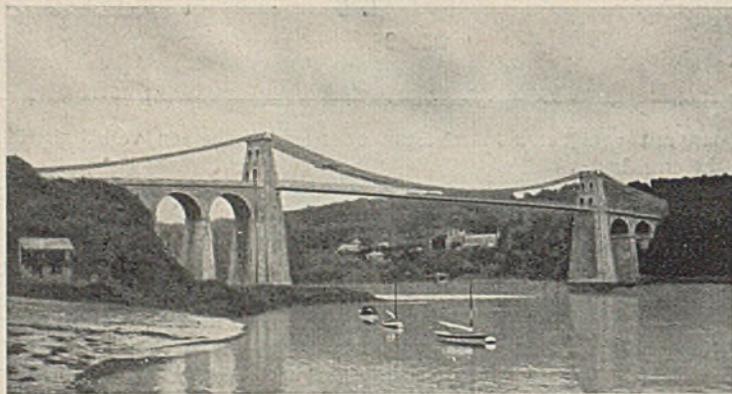


Bild 1. Brücke über die Menai-Meerenge.

Die Menai-Brücke (Bild 1) ist eine der ersten in Europa gebauten Kettenhängebrücken. Ihre Mittelöffnung besitzt 175 m Spannweite, die Gesamtlänge beträgt 354 m. Dem seinerzeitigen Stande des Brückenbaues entsprechend ist sie als unversteifte Hängebrücke ausgeführt. Die Fahrbahn liegt 32 m über Hochwasser. Die aus Marmor von der Insel Anglesea erbauten Pylonen überragen die Fahrbahn noch um 16 m. Die Pfeilerkronen tragen Rollenlager zur Aufnahme der Ketten. Die Ketten sind in vier Reihen angeordnet, von denen die beiden mittleren näher beieinander liegen. Zwischen letzteren ist der Fußweg angeordnet, er wird also beiderseits von Fahrbahnen flankiert. Jede Kettenreihe besteht aus vier übereinanderliegenden Strängen. Die Rückhalteketten sind bis in den Felsen geführt und dort in gußeisernen Ankerplatten verankert. Einzelheiten der Kettenausbildung zeigt Bild 2. Die Hängestangen haben quadratischen Querschnitt von 25 mm Seitenlänge. Die Fahrbahn besteht aus 90 mm hohen und 13 mm dicken Schienen als Querträger, auf denen ein aus zwei Lagen Bohlen gebildeter Längsbelag liegt. Auf den beiden

Fahrbahnen kommt hierzu noch ein Querbelag aus 75 mm dicken Bohlen. Die Brückenbreite beträgt 8,5 m.

Infolge der unversteiften Bauart hat die Menai-Brücke von jeher unter der Einwirkung äußerst starker Seestürme zu leiden gehabt, welche die Fahrbahn mehrmals beschädigten, besonders in den Jahren 1826, 1836 und 1839. Nach Wiederherstellung der beschädigten Teile konnte die Brücke jedoch stets wieder in Betrieb genommen werden.

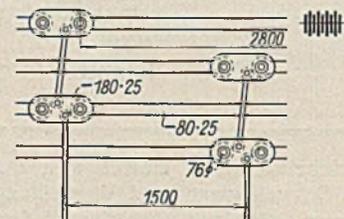


Bild 2. Kettenausbildung.

Auch im vorigen Jahre trat wieder eine teilweise Beschädigung infolge eines schweren Sturmes ein. Die angerichteten Zerstörungen sind bereits ausgebessert. Inzwischen wurde die Ingenieurfirma Sir A. Gibb mit der Aufstellung eines Entwurfes für den Umbau der Brücke beauftragt. Nach diesem Entwurf bleibt die charakteristische Gestalt des Bauwerkes bis auf geringfügige Änderungen erhalten, die neue Tragkonstruktion wird jedoch den heutigen Verkehrslasten entsprechend ausgebildet. Die Zahl der Tragketten wird vermindert. Der bisher zwischen den Fahrbahnen liegende Fußweg wird beseitigt, dafür werden zwei seitliche, auf Konsolen ausgekragte Gehwege außerhalb der Hängestangen angeordnet. Die Toröffnungen in den Pylonen, durch welche die Fahrbahnen geführt sind und welche die freie Sicht für den Fahrer stark einengten, werden geweitet. Sonst werden an den Pylonen nur geringfügige Änderungen vorgenommen.

Die Kosten des Umbaus werden mit 2,5 Mill. RM angegeben.

(Nach Eng. News-Rec. v. 18. 3. 1937, S. 422.)

INHALT: Grundsätzliche Bemerkungen zur Frage der Beulsicherheit der Stegbleche vollwandiger Blechträger. — Wurzelfehler bei Stumpfnähten an geschweißten Stahlüberbauten. — Verschiedenes.

Verantwortlich für den Inhalt: Geh. Regierungsrat Prof. A. Hertwig, Berlin-Charlottenburg.
Verlag von Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin W 9.
Druck der Buchdruckerei Gebrüder Ernst, Berlin SW 68.